

# 控制与决策

Control and Decision

配置弹簧阻尼空间机器人基于灰狼优化算法的双臂捕获卫星操作缓冲柔顺控制

朱安, 陈力

引用本文:

朱安,陈力. 配置弹簧阻尼空间机器人基于灰狼优化算法的双臂捕获卫星操作缓冲柔顺控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 2779–2789.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0567>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于RBF神经网络的多关节机器人固定时间滑模控制

Fixed-time sliding mode control of multi-joint robot based on RBF neural network  
*控制与决策*. 2022, 37(11): 2790–2798 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0421>

#### 安全平滑的改进时间弹性带轨迹规划算法

Safe and smooth improved time elastic band trajectory planning algorithm  
*控制与决策*. 2022, 37(8): 2008–2016 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0068>

#### 空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出反馈神经网络避撞柔顺控制

Collision avoidance and compliance control based on event sampling output feedback neural network for space robot dual arm capture satellite operation  
*控制与决策*. 2021, 36(9): 2113–2122 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1754>

#### 空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制

Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft  
*控制与决策*. 2021, 36(2): 355–362 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0507>

#### 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller  
*控制与决策*. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

# 配置弹簧阻尼空间机器人基于灰狼优化算法的 双臂捕获卫星操作缓冲柔顺控制

朱安, 陈力<sup>†</sup>

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

**摘要:** 空间机器人在捕获卫星操作过程中会发生剧烈碰撞, 若不对其脆弱的关节进行保护, 则可能造成空间机器人的损坏. 为此在空间机器人关节电机与机械臂之间加入一种弹簧阻尼机构, 该机构不仅可以在碰撞过程中缓冲、吸收冲击能量, 而且可以通过设计与之配合的柔顺策略实现混合体系统的镇定控制. 首先, 针对捕获前的双臂空间机器人开环系统与目标卫星系统, 分别利用 Lagrange 法与 Newton-Euler 法建立分体系统动力学模型; 结合动量定理、速度约束、闭链几何约束及牛顿第三定律, 导出捕获后的闭链混合体系统动力学模型, 并计算冲击效应与碰撞力; 然后, 针对混合体系统的控制问题, 提出一种配合弹簧阻尼机构的积分终端滑模控制方案, 通过灰狼优化算法对滑模控制器的参数进行优化, 实现混合体系统快速、稳定的镇定控制; 最后, 利用 Lyapunov 定理证明系统的稳定性, 并通过数值仿真验证缓冲机构的抗冲击性能与柔顺策略的有效性.

**关键词:** 双臂空间机器人; 捕获操作; 弹簧阻尼机构; 积分终端滑模; 灰狼优化算法; 柔顺策略

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0567

引用格式: 朱安, 陈力. 配置弹簧阻尼空间机器人基于灰狼优化算法的双臂捕获卫星操作缓冲柔顺控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2779-2789.

## Based on grey wolf optimizer buffer and compliance control of dual-arm space robot capture satellite operation with spring-damper device

ZHU An, CHEN Li<sup>†</sup>

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** A space robot will violently collide with satellites in the capture operation. If its fragile joints are not protected, the space robot may be damaged. Therefore, a spring-damper device is added between a joint motor and a manipulator, which can not only digest and absorb the impact energy in the collision process, but also design a compliance strategy matched with the buffer device to realize the calm control of the hybrid system. Firstly, the dynamic modes of the dual-arm space robot open-loop system and target satellite system before capturing are established using the Lagrange function and newton-Euler. Combined with the momentum theorem, velocity constraints, closed-chain geometric constraints and Newton's third law, the closed-chain dynamic model of the hybrid system after capture is obtained, and impact effect and impact force are calculated. Then, in order to control the hybrid system, an integral terminal sliding mode control matched with the spring-damper device is proposed. The parameters of the sliding mode controller are optimized by the grey wolf optimizer to realize fast and stable calm control of the hybrid system. Finally, the stability of the hybrid system is proved using the Lyapunov theorem, and the anti-impact performance of the spring-damper device and the effectiveness of compliance strategy are verified by numerical simulation.

**Keywords:** dual-arm space robot; capture operation; spring-damper device; integral terminal sliding mode; grey wolf optimizer; compliance strategy

## 0 引言

随着人类对太空探索的进一步加深, 空间机器人正在扮演着越来越重要的角色. 半个世纪以来, 各航

天大国向太空发射的卫星数量高达 7 000 多颗, 但其中能正常工作的却只有 1 000 余颗<sup>[1]</sup>, 大量失效卫星的存在极大地浪费了有限的空间轨道资源. 另外, 空

收稿日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-07-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51741502); 福建省自然科学基金项目(2020J01450).

责任编辑: 黄永安.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: chnle@fzu.edu.cn.

间机器人失效的主要原因是其携带的燃料耗尽,而不是发生了严重的故障,若能对其进行燃料补给,其使用年限将被极大地延长,可有效降低空间探索成本。

目前,使用空间机器人完成卫星的回收与燃料补给在理论上和技术上都是可行的,因此对空间机器人捕获卫星操作的研究受到了诸多学者的关注<sup>[2-6]</sup>。相较于单臂空间机器人,由于双臂空间机器人具有更高的灵活性、更大的负载、能执行更加复杂的任务,逐渐成为了捕获操作任务的研究热点<sup>[7-10]</sup>。但其捕获过程存在的非完整动力学约束,动量、动量矩与能量传递变化,捕获前后结构开、闭环变拓扑,闭环接触几何约束,运动学约束等问题,都是限制其发展的主要因素。程靖等<sup>[11]</sup>研究了双臂空间机器人捕获卫星的碰撞力学并提出了一种镇定控制策略。Jia等<sup>[12]</sup>为实现双臂空间机器人末端执行器有效地控制卫星,将加速度约束方程并入无约束系统的凯恩方程,导出约束系统的降阶运动方程,并对应提出了一种基于动力学的自适应控制方法。Yan等<sup>[13]</sup>针对双臂空间机器人系统的基座、机械臂与卫星之间的多重动态耦合,提出了一种虚拟基座建模方法和协调控制策略。

空间机器人捕获卫星操作的过程大致可简化为如下阶段:

第1阶段:对被捕获卫星进行观测;

第2阶段:空间机器人逐渐接近被捕获卫星,进行捕获阶段的准备;

第3阶段:空间机器人末端执行器与被捕获卫星接触、碰撞;

第4阶段:捕获完成后,对形成的混合体系统进行镇定控制。

其中第3和第4阶段是最具风险和最难控制的阶段,特别是对非合作卫星的捕获,由于其具有高速、旋转的特性,若不对撞击过程进行分析并设计合适的柔顺控制策略,将导致捕获操作的失败。

针对第3阶段的碰撞分析,Dimitrov等<sup>[14]</sup>详细建立了空间机器人捕获卫星过程的接触动力学模型,并分析了捕获过程的动量交换问题。Yoshida等<sup>[15]</sup>从角动量分布的角度讨论了碰撞接触前后空间机器人姿态偏差的最小化问题,并通过在第2阶段使用偏置动量法、在第3阶段使用阻抗控制法成功地实现了对卫星的捕获操作。Flores-Abad等<sup>[16]</sup>为减小碰撞过程对空间机器人载体的影响,对旋转卫星的运动状态进行分析,预测了机器人进行捕获的最佳时机。值得注意的是,大多数研究者都忽略了对关节的保护问题。一般情况下,空间机器人的关节是其最为脆弱的部分,

在捕获具有高速、旋转特性的卫星时,关节处将受到很大的冲击力矩,若未对关节提供相应的保护,则很容易造成空间机器人的损坏。因此,本文在空间机器人关节电机与机械臂之间加入了一种弹簧阻尼机构(spring-damper device, SDD),利用弹簧缓冲、吸收碰撞过程中在关节处产生的冲击能量,通过阻尼器抑制由弹簧引起的柔性振动。

针对第4阶段的镇定控制,Raina等<sup>[17]</sup>采用基于解耦自然正交补(DeNOC)的数学模型和闭环约束方程,建立多臂空间机器人的动力学模型,并设计了一种自适应无反应控制策略实现对参数未知卫星的捕获。Uyama等<sup>[18]</sup>提出了一种基于接触动力学模型的开环阻抗控制策略,通过设置期望恢复系数和期望阻尼比调节阻抗参数,实现对混合体系统的镇定控制。Abdul等<sup>[19]</sup>为实现载体姿态扰动最小化,提出了一种无反应视觉伺服控制器,采用任务函数法对混合体系统进行协调控制。近年来,积分终端滑模控制因其收敛速度快、鲁棒性强、易于实现等优点受到研究人员的广泛的关注<sup>[20-23]</sup>。由此提出一种非奇异积分终端滑模控制方案,该方案可快速抑制混合体系统的翻滚,从而实现快速的镇定控制。相较于递推微积分终端滑模控制<sup>[21]</sup>,所提出方案设计更加简单直观,易于实现。

灰狼优化算法<sup>[24]</sup>(grey wolf optimizer, GWO)是一种元启发式搜索算法,其模仿自然界中灰狼群的狩猎方法,将狼群主要分为 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼、 $\delta$ 狼和 $\omega$ 狼4种,实现对控制器参数的寻优。目前,GWO已被应用到多个领域,Sanjay等<sup>[25]</sup>通过GWO优化分配分布式发电机组,使配电网中的功率损失最小化;Li等<sup>[26]</sup>利用GWO优化图像阈值和模糊熵的离散实现了图像的最佳分割;Zhao等<sup>[27]</sup>应用GWO在加权融合中寻找最佳深度对轴承性能退化函数进行优化。为进一步提升控制器的控制性能,本文采用GWO对积分终端滑模控制器的参数进行优化,以保证严重失稳的混合体系统可以实现成功、有效的镇定控制。

本文设计了一种SDD,用以保护双臂空间机器人捕获非合作卫星的过程中关节不受冲击破坏。分别利用Lagrange法与Newton-Euler法导出空间机器人与被捕获卫星的分体系统动力学模型,结合Newton第三定律、动量守恒定理、捕获点速度约束、闭链几何约束,导出闭链混合体系统动力学模型。同时,提出一种积分终端滑模控制方案对混合体系统进行镇定控制,且采用GWO对控制器的参数进行优化,并通过仿真分析验证所提出策略的有效性。

# 1 SDD结构及缓冲柔顺策略

## 1.1 SDD结构

SDD结构如图1所示,其主要由旋转阻尼器与扭转弹簧组成.扭转弹簧用于传动与冲击能量的吸收,旋转阻尼器则实时提供阻力抑制柔性振动.扭转弹簧与旋转阻尼器两端分别与电机、机械臂端固连,为了使阻尼器实时同步抑制柔性振动,其嵌套在弹簧内部实现同步运动.将电机端、机械臂端的阻力等效为阻尼器以便更加真实地描述关节受力.图中 $K_{si}(i = 1, 2, \dots, 6)$ 、 $D_{ti}$ 分别为扭转弹簧的刚度、旋转阻尼器的阻尼系数; $D_{mi}$ 、 $D_{Li}$ 分别为电机、机械臂端等效阻尼器的阻尼系数.

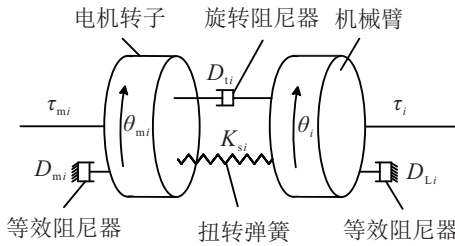


图1 SDD结构

## 1.2 缓冲柔顺策略描述

在捕获操作的第3阶段,机械臂末端执行器与被捕获卫星发生接触、碰撞,机械臂端将产生很大的冲击力矩.该力矩在传导至电机转子的过程中,会被弹簧和阻尼器快速卸载,从而实现对关节的保护.在捕获操作的第4阶段,由于冲击效应的存在,电机开启时会产生瞬时冲击力矩,若该力矩超过关节所能承受的极限而未关停电机,则关节很可能会发生损坏.因此,需要根据关节所能承受的极限力矩值设置一个关机力矩阈值.当检测到冲击力矩超过所设阈值后电机关停,此时SDD中的弹簧将会提供弹力以减小关节所受冲击力矩,阻尼器则会快速耗能抑制柔性振动.然而,在实际操作中,如果只设置一个关机力矩阈值,则会导致电机频繁开关机,很容易造成电机的损坏.由此本文所提出的缓冲柔顺策略同时设置了开、关机阈值.当检测到关节所受冲击力矩超过关机力矩阈值时电机关停;当SDD将冲击力矩降低到开机阈值时电机再次开启.

# 2 动力学建模与碰撞分析

## 2.1 分体系统动力学建模

配置SDD的双臂空间机器人系统与被捕获卫星系统如图2所示.其中: $O_0$ 、 $O_s$ 、 $O_i(i = 1, 2, \dots, 6)$ 分别为载体质心、卫星质心、各关节铰中心; $XOY$ 为惯性参考坐标系; $x_0O_0y_0$ 、 $x_iO_iy_i$ 、 $x_sO_sy_s$ 分别为固定

在载体质心、关节铰中心、被捕获卫星质心上的坐标系.文中所用符号定义如下: $m_0$ 、 $I_0$ 、 $L_0$ 分别为载体质量、转动惯量和质心 $O_0$ 到 $O_1$ 或 $O_4$ 的距离; $m_s$ 、 $I_s$ 、 $L_s$ 分别为卫星的质量、转动惯量和 $O_s$ 到两端末端把手的距离; $m_i$ 、 $I_i$ 、 $L_i$ 分别为第 $i$ 个机械臂的质量、转动惯量、长度; $I_{mi}$ 为第 $i$ 个电机转子的转动惯量; $d_i$ 为第 $i$ 个关节铰中心到机械臂 $i$ 质心的距离; $\theta_0$ 、 $\theta_i$ 、 $\theta_s$ 、 $\theta_{mi}$ 分别为载体姿态角、机械臂转角、卫星姿态角和电机转子转角; $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 分别为载体质心 $O_0$ 与 $O_1$ 、 $O_4$ 连线相对 $x_0$ 轴的夹角.

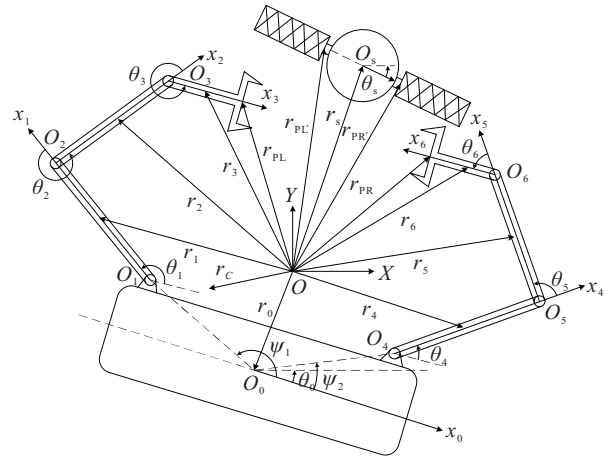


图2 配置SDD的双臂空间机器人系统与被捕获卫星系统

图2所示双臂空间机器人系统动能为

$$T_r = \sum_{i=0}^6 \left( \frac{1}{2} m_i \dot{r}_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \right) + \sum_{j=1}^6 \left( \frac{1}{2} I_{mj} \omega_{mj}^2 \right). \quad (1)$$

其中: $r_0$ 、 $r_i(i = 1, 2, \dots, 6)$ 分别为载体、各机械臂质心位置矢径, $\omega_i$ 、 $\omega_{mj}$ 分别为机械臂、电机转子角速度.

若忽略太空的微重力影响,则臂空间机器人系统的势能来源于SDD中的弹簧,其势能表达式为

$$U_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 [k_{si}(\theta_{mi} - \theta_i)^2]. \quad (2)$$

由于SDD的引入,双臂空间机器人系统存在非有势力,补充耗散函数

$$\vartheta_r = \sum_{i=1}^6 [D_{mi} \dot{\theta}_{mi}^2 + D_{ti}(\dot{\theta}_{mi} - \dot{\theta}_i)^2 + D_{Li} \dot{\theta}_i^2]. \quad (3)$$

含耗散力的Lagrange方程为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_r}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L_r}{\partial q_r} + \frac{\partial \vartheta_r}{\partial \dot{q}_r} = Q. \quad (4)$$

其中: $L_r = T_r - U_r$ 为Lagrange函数, $Q \in R^{9 \times 1}$ 为系统广义力, $q_r = [x_0, y_0, \theta_0, q_g^T]^T$ 为双臂空间机器人系统的广义坐标, $q_g = [\theta_L^T, \theta_R^T]^T$ , $\theta_L = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ , $\theta_R = [\theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$ .

结合式(1)~(4)可得捕获操作前双臂空间机器人系统动力学模型为

$$\begin{cases} M_r \ddot{q}_r + (H_r + D_L) \dot{q}_r = \tau_r + J_r^T F_p, \\ I_m \ddot{q}_m + D_{mg} \dot{q}_m + \tau_g = \tau_m, \\ K_s (q_m - q_g) + D_{tg} (\dot{q}_m - \dot{q}_g) = \tau_g. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $M_r \in \mathbf{R}^{9 \times 9}$  为双臂空间机器人对称、正定的惯量矩阵,  $H_r \dot{q}_r \in \mathbf{R}^{9 \times 1}$  为包含科氏力、离心力矩阵,  $D_L \in \mathbf{R}^{9 \times 9}$  为增广的机械臂等效阻尼系数矩阵,  $D_{mg} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  为电机等效阻尼系数矩阵,  $D_{tg} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  为SDD中的阻尼系数矩阵;  $q_m = [\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{m6}]^T$ ;  $\tau_r = [\tau_B^T, \tau_0, \tau_g^T]^T$ ,  $\tau_B = [0, 0]^T$  为载体位置不受控,  $\tau_0$  为载体控制力矩,  $\tau_g = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_6]^T$  为关节输入力矩列向量,  $\tau_m = [\tau_{m1}, \tau_{m2}, \dots, \tau_{m6}]^T$  为电机输出力矩列向量;  $I_m \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  为电机转子转动惯量矩阵;  $K_s \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  为SDD中弹簧的刚度矩阵;  $J_r \in \mathbf{R}^{6 \times 9}$  为末端抓手捕获点的运动雅克比矩阵;  $F_p \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$  为捕获点所受作用力。

采用Newton-Euler法可获得捕获前卫星的动力学模型为

$$M_s \ddot{q}_s = J_s^T F_{p'}. \quad (6)$$

其中:  $M_s \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  为卫星对称、正定的惯量矩阵;  $q_s = [x_s, y_s, \theta_s]^T$  为卫星系统广义坐标,  $x_s, y_s$  为卫星质心坐标,  $J_s \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$  为卫星把手被捕获点的运动雅克比矩阵;  $F_{p'} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$  为被捕获点所受作用力。

## 2.2 混合体系统动力学建模

捕获操作过程中,双臂空间机器人与被捕获卫星发生碰撞,由于相互作用力的存在,各自的运动状态会发生变化。卫星把手上的力可分解为

$$F_{p'} = (J_s^T)^+ M_s \ddot{q}_s + F_1. \quad (7)$$

其中:  $(J_s^T)^+$  为  $J_s^T$  的伪逆, 定义为  $(J_s^T)^+ = J_s (J_s^T J_s)^{-1}$ ;  $F_1$  为在碰撞时间内左右机械臂非协调运动导致对卫星的压紧力或拉力, 在  $J_r^T$  零空间内  $J_r^T F_1 = 0$ 。由式(5)和(7)可得

$$\begin{aligned} M_r \ddot{q}_r + (H_r + D_L) \dot{q}_r + \\ J_r^T (J_s^T)^+ M_s \ddot{q}_s + J_r^T F_1 = \tau_r. \end{aligned} \quad (8)$$

捕获操作完成后,双臂空间机器人与被捕获卫星锁紧固连形成闭链混合体系统。该系统内,机器人左、右臂广义坐标与广义速度存在如下关系:

$$\begin{cases} \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \theta_4 + \theta_5 + \theta_6 + k\pi, \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_4 + \dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_6. \end{cases} \quad (9)$$

由六边形内角和定理可计算出  $k = -1$ 。式(9)结合机械臂末端运动学关系可得

$$J_{OL} \dot{\theta}_L = J_{OR} \dot{\theta}_R. \quad (10)$$

其中:  $J_{OL} = [J_{OL1}^T, \mathbf{E}_{3 \times 1}]^T$ ,  $J_{OR} = [J_{OR1}^T, \mathbf{E}_{3 \times 1}]^T$ ,  $J_{OL1}, J_{OR1} \in \mathbf{R}^{2 \times 3}$  分别为基座连体坐标系下两个运动相关点对应的运动Jacobian矩阵;  $\mathbf{E}_{m \times n}$  为  $m \times n$  阶元素均为1的矩阵。设  $q_L = [x_0, y_0, \theta_0, \theta_L^T]^T$  为闭链混合体系统广义坐标列向量, 由式(10)可解得

$$\dot{q}_r = U^T \dot{q}_L. \quad (11)$$

其中:  $U = [\mathbf{E}_{6 \times 6}, \mathbf{U}_1^T]$ ,  $\mathbf{U}_1 = [\mathbf{0}_{3 \times 3}, J_{OR}^{-1} J_{OL}]$ 。对式(11)求导可得

$$\ddot{q}_r = \dot{U}^T \dot{q}_L + U^T \ddot{q}_L. \quad (12)$$

捕获操作完成后,捕获点的速度满足

$$\dot{S}_p = \dot{S}_{p'}. \quad (13)$$

其中:  $\dot{S}_p = J_{rp} \dot{q}_L$ ,  $\dot{S}_{p'} = J_{sp'} \dot{q}_s$ ;  $J_{rp} \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ ,  $J_{sp'} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  分别为机器人左臂末端点、被捕获卫星左把手在惯性参考坐标系下对应的增广运动Jacobian矩阵。由式(13)可解出

$$\dot{q}_s = J_{sp'}^{-1} J_{rp} \dot{q}_L. \quad (14)$$

对式(14)求导可得

$$\ddot{q}_s = J_{sp'}^{-1} (\dot{J}_{rp} \dot{q}_L + J_{rp} \ddot{q}_L) - J_{sp'}^{-1} \dot{J}_{sp'} J_{rp} \dot{q}_L. \quad (15)$$

将式(11)、(12)、(14)、(15)代入(8),可得

$$\begin{aligned} T \ddot{q}_L + [L + G + N + \\ P J_{sp'}^{-1} (\dot{J}_{rp} - J_{sp'}^{-1} \dot{J}_{sp'} J_{rp})] \dot{q}_L = U \tau_r. \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $L = U M_r U^T$ ,  $G = U H_r U^T$ ,  $N = U D_L U^T$ ,  $P = U J_r^T (J_s^T)^+ M_s$ ,  $T = L + P J_{sp'}^{-1} J_{rp}$ 。

若令  $H_h = L + G + P J_{sp'}^{-1} (\dot{J}_{rp} - J_{sp'}^{-1} \dot{J}_{sp'} J_{rp})$ ,  $M_h = T$ ,  $D_{Lh} = N$ ,  $\tau_h = U \tau_r$ , 则式(16)可简化为

$$M_h \ddot{q}_L + (H_h + D_{Lh}) \dot{q}_L = \tau_h. \quad (17)$$

由于式  $H_h$ 、 $D_{Lh}$  的前两列元素均为零, 可将式(17)整理成完全能控形式的闭链混合体系统动力学模型

$$\begin{cases} M_c \ddot{q}_c + (H_c + D_{Lc}) \dot{q}_c = \tau_c, \\ I_m \ddot{q}_m + D_{mg} \dot{q}_m + \tau_g = \tau_m, \\ K_s (q_m - q_g) + D_{tg} (\dot{q}_m - \dot{q}_g) = \tau_g. \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $M_c = M_{h22} - M_{h21} M_{h11}^{-1} M_{h12}$ ,  $H_c = H_{h22} - M_{h21} M_{h11}^{-1} H_{h12}$ ,  $D_{Lc} = D_{Lh22} - M_{h21} M_{h11}^{-1} D_{Lh12}$ ;  $M_{h11}, H_{h11}, D_{Lh11} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ ,  $M_{h12}, H_{h12}, D_{Lh12} \in \mathbf{R}^{2 \times 4}$ ,  $M_{h21}, H_{h21}, D_{Lh21} \in \mathbf{R}^{4 \times 2}$ ,  $M_{h22}, H_{h22}, D_{Lh22} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$  为  $M_h, H_h, D_{Lh}$  对应的分块矩阵。

## 2.3 碰撞冲击效应与碰撞力计算

双臂空间机器人捕获卫星操作过程中未受到外力, 因此整个系统满足动量守恒。假设碰撞时间为

$\Delta t$ ,对式(5)和(6)在碰撞时间内积分,得

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} [M_r \ddot{q}_r + (H_r + D_L) \dot{q}_r] dt = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (\tau_r + J_r^T F_P) dt, \quad (19)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} M_s \ddot{q}_s dt = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} J_s^T F_{P'} dt, \quad (20)$$

其中 $t_0$ 为碰撞时刻.由于碰撞时间 $\Delta t$ 很短,在这一时段内可以认为系统的广义坐标未发生突变,仅有广义速度和广义加速度发生突变.为了保护关节电机,在捕获碰撞阶段电机处于关机状态,故式(20)可近似写为

$$\begin{cases} M_r [\dot{q}_r(t_0 + \Delta t) - \dot{q}_r(t_0)] = J_r^T f_P, \\ M_s [\dot{q}_s(t_0 + \Delta t) - \dot{q}_s(t_0)] = J_s^T f_{P'}. \end{cases} \quad (21)$$

其中:  $f_P = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} F_P dt$ ,  $f_{P'} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} F_{P'} dt$ 为碰撞冲量,且有  $f_P + f_{P'} = \mathbf{0}_{6 \times 1}$ .

结合式(11)、(14)、(21)可解得碰撞冲击效应

$$\dot{q}_r(t_0 + \Delta t) = T^{-1} [L \dot{q}_L(t_0) + P \dot{q}_s(t_0)]. \quad (22)$$

将式(22)代入(21)可解得碰撞力为

$$F_P = \frac{f_P}{\Delta t}, \quad (23)$$

其中

$$f_P = (J_r)^+ M_r U^T [(T^{-1} L - E_{9 \times 9}) \dot{q}_L(t_0) + T^{-1} P \dot{q}_s(t_0)].$$

### 3 控制器设计

#### 3.1 GWO算法

为了改善控制器的性能,提升镇定控制的速度并增加其稳定性,利用GWO<sup>[24]</sup>对控制器参数进行优化.在GWO中,灰狼被分为如下4种.

1)  $\alpha$ 狼:  $\alpha$ 狼是整个灰狼群在捕猎过程中的领导者,是最具智慧和能力的个体.

2)  $\beta$ 狼:  $\beta$ 狼是二级优势狼,听从 $\alpha$ 狼的命令,并领导其他下属狼( $\delta$ 狼和 $\omega$ 狼),同时也是 $\alpha$ 狼的候选者.

3)  $\delta$ 狼:  $\delta$ 狼是三级优势狼,听从 $\alpha$ 狼和 $\beta$ 狼的命令,并领导其他下属狼( $\omega$ 狼).

4)  $\omega$ 狼:  $\omega$ 狼是最低级的狼,听从其他优势狼( $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼)的命令.

在捕猎过程中,首先由 $\alpha$ 狼带领狼群搜索、跟踪、接近猎物.当距离猎物的范围足够小时, $\beta$ 狼、 $\delta$ 狼在 $\alpha$ 狼的指挥下对猎物进行围攻,并召唤周围的 $\omega$ 狼对猎物进行攻击;当猎物移动时,狼群形成的包围圈也随之移动,直至捕获猎物.基于此,GWO对控制器参数的优化过程可分为包围、追捕、攻击3个阶段.

包围:在狼群包围猎物的过程中,猎物与灰狼之间的距离可表示为

$$\begin{cases} D = |CX_P(t) - X(t)|, \\ X(t+1) = X_P(t) - AD. \end{cases} \quad (24)$$

其中: $X_P(t)$ 为猎物的位置, $X(t)$ 为灰狼位置, $A$ 和 $C$ 为系数因子,其表达式为

$$\begin{cases} A = 2av_1 - a, \\ C = 2v_2. \end{cases} \quad (25)$$

$a$ 从2到0呈线性递减, $v_1$ 、 $v_2$ 为 $[0, 1]$ 的随机数.

追捕:狼群对猎物包围后, $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼在 $\alpha$ 狼的带领下对猎物进行追捕,在此过程中灰狼的位置随着猎物的逃跑而改变, $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼、 $\delta$ 狼的位置更新满足如下关系:

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 X_\alpha(t) - X(t)|, X_1 = X_\alpha - AD_\alpha; \\ D_\beta = |C_1 X_\beta(t) - X(t)|, X_2 = X_\beta - AD_\beta; \\ D_\delta = |C_1 X_\delta(t) - X(t)|, X_3 = X_\delta - AD_\delta. \end{cases} \quad (26)$$

因此,狼群的位置将更新如下:

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}. \quad (27)$$

攻击:追捕上猎物后,狼群对猎物进行攻击并捕获猎物,即得到最优解.该过程主要通过 $a$ 值递减实现,当 $a$ 值从2线性递减至0时,其对应的 $A$ 值也在 $[-a, a]$ 变化.当 $|A| \leq 1$ 时,表明狼群的下一个位置会更加接近猎物位置;当 $|A| > 1$ 时,狼群会朝着远离猎物的方向分散,导致GWO算法失去最优解位置,陷入一个局部最优的过程.

本文为了强调 $\alpha$ 解、 $\beta$ 解和 $\delta$ 解的权重关系,将强调系数加入式(27),使 $X_1$ 的权重大于 $X_2$ , $X_2$ 的权重大于 $X_3$ .因此式(27)改写为

$$X(t+1) = \frac{\alpha_F X_1 + \beta_F X_2 + \delta_F X_3}{3}, \quad (28)$$

其中 $\alpha_F > \beta_F > \delta_F$ 为强调系数.

#### 3.2 积分终端滑模控制器设计

**定理1**  $M_c$ 、 $H_c$ 、 $D_{Lc}$ 有界<sup>[28]</sup>:  $m_{c1} \leq \|M_c\| \leq m_{c2}$ ,  $\|H_c\| \leq h_{c3} \|\dot{q}_c\|$ ,  $\|D_{Lc}\| \leq d_{c4}$ .

**假设1** 系统不确定参数可以写为如下形式:

$$\begin{cases} M_c = \hat{M}_c + \Delta M_c, \\ H_c = \hat{H}_c + \Delta H_c, \\ D_{Lc} = \hat{D}_{Lc} + \Delta D_{Lc}. \end{cases} \quad (29)$$

其中: $\hat{M}$ 、 $\hat{H}$ 、 $\hat{D}$ 为系统的名义参数, $\Delta M_c$ 、 $\Delta H_c$ 、 $D_{Lc}$ 为系统的不确定参数.

**引理1** 对于给定的系统 $\dot{x} = f(x)$ ,  $f(0) = 0$ ,

$\boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^n$ ,若存在一个正定的连续函数 $V(\boldsymbol{x})$ 、实数 $\varepsilon > 0$ 和 $\gamma \in (0, 1)$ ,满足 $\dot{V}(\boldsymbol{x}) + \varepsilon V^\gamma(\boldsymbol{x}) \leq 0$ ,则该系统可在有限时间内收敛<sup>[29]</sup>.

为方便控制器设计,定义 $\text{Sig}^\mu(\cdot) \in \mathbf{R}^n$ 为

$$\text{Sig}^\mu(\boldsymbol{\xi}) = [|\xi_1|^\mu \text{sgn}(\xi_1), |\xi_2|^\mu \text{sgn}(\xi_2), \dots, |\xi_n|^\mu \text{sgn}(\xi_n)]^T. \quad (30)$$

其中: $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T, 0 < \mu < 1$ .

基于假设1,可将混合系统动力学方程重写为

$$\hat{\boldsymbol{M}}_c \ddot{\boldsymbol{q}}_c + (\hat{\boldsymbol{H}}_c + \hat{\boldsymbol{D}}_{Lc}) \dot{\boldsymbol{q}}_c = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\rho}, \quad (31)$$

其中 $\boldsymbol{\rho} = -\Delta \boldsymbol{M}_c \ddot{\boldsymbol{q}}_c - (\Delta \boldsymbol{H}_c + \Delta \boldsymbol{D}_{Lc}) \dot{\boldsymbol{q}}_c$ 为系统参数不确定项. 通过式(18)得

$$\Delta \boldsymbol{M}_c \ddot{\boldsymbol{q}}_c = \boldsymbol{\Gamma} [\boldsymbol{\tau}_c - (\boldsymbol{H}_c + \boldsymbol{D}_{Lc}) \dot{\boldsymbol{q}}_c]. \quad (32)$$

其中: $\boldsymbol{\Gamma} = \boldsymbol{I}_{4 \times 4} - \hat{\boldsymbol{M}}_c \boldsymbol{M}_c^{-1}, \boldsymbol{I}_{4 \times 4}$ 为 $4 \times 4$ 的单位矩阵. 参考文献[30],可选取如下形式的 $\hat{\boldsymbol{M}}_c$ :

$$\hat{\boldsymbol{M}}_c = \frac{2}{c_1 + c_2} \boldsymbol{I}_{4 \times 4}, \quad (33)$$

其中 $c_1, c_2$ 分别为 $\boldsymbol{M}_c^{-1}$ 的上、下界.

通过文献[30]可知 $\boldsymbol{\Gamma}$ 有界,且满足

$$\|\boldsymbol{\Gamma}\| \leq \frac{c_2 - c_1}{c_2 + c_1} < 1. \quad (34)$$

若令 $\delta = (c_2 - c_1)/(c_2 + c_1)$ ,则结合定理1、假设1、式(32)和(34)可得系统参数不确定项 $\boldsymbol{\rho}$ 有界,即

$$\|\boldsymbol{\rho}\| \leq b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \delta \|\boldsymbol{\tau}_c\|, \quad (35)$$

其中 $b_1 > 0, b_2 > 0$ 为正常数.

设计如下形式的积分滑模面:

$$\boldsymbol{S} = \dot{\boldsymbol{e}} + \int_0^t (\boldsymbol{K}_2 \text{Sig}^{\mu_2}(\dot{\boldsymbol{e}}(\sigma)) + \boldsymbol{K}_1 \text{Sig}^{\mu_1}(\boldsymbol{e}(\sigma))) d\sigma. \quad (36)$$

其中: $\boldsymbol{e} = \boldsymbol{q}_c - \boldsymbol{q}_d, \boldsymbol{q}_d$ 为给定的期望轨迹; $\boldsymbol{K}_1, \boldsymbol{K}_2 \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 为正定常数矩阵; $0 < \mu_1 < 1, \mu_2 = 2\mu_1/(\mu_1 + 1)$ .

基于假设1、式(31)和(36)可得

$$\hat{\boldsymbol{M}}_c \dot{\boldsymbol{S}} = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\rho} - \hat{\boldsymbol{M}}_c \ddot{\boldsymbol{q}}_d - (\hat{\boldsymbol{H}}_c + \hat{\boldsymbol{D}}_{Lc}) \dot{\boldsymbol{q}}_c + \hat{\boldsymbol{M}}_c (\boldsymbol{K}_2 \text{Sig}^{\mu_2}(\dot{\boldsymbol{e}}) + \boldsymbol{K}_1 \text{Sig}^{\mu_1}(\boldsymbol{e})), \quad (37)$$

进而,设计如下形式的非奇异终端滑模控制信号:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_c = \boldsymbol{\tau}_{v1} + \boldsymbol{\tau}_{v2} + \boldsymbol{\tau}_{v3}, \\ \boldsymbol{\tau}_{v1} = \hat{\boldsymbol{M}}_c \ddot{\boldsymbol{q}}_d + (\hat{\boldsymbol{H}}_c + \hat{\boldsymbol{D}}_{Lc}) \dot{\boldsymbol{q}}_c, \\ \boldsymbol{\tau}_{v2} = -\hat{\boldsymbol{M}}_c (\boldsymbol{K}_2 \text{Sig}^{\mu_2}(\dot{\boldsymbol{e}}) + \boldsymbol{K}_1 \text{Sig}^{\mu_1}(\boldsymbol{e})), \\ \boldsymbol{\tau}_{v3} = \frac{\boldsymbol{S}}{\|\boldsymbol{S}\|} u. \end{cases} \quad (38)$$

其中: $u = -\frac{k_0 + b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \delta \|\boldsymbol{\tau}_{v1} + \boldsymbol{\tau}_{v2}\|}{1 - \delta}$ , $k_0 > 0$ 为增益系数.

将设计的控制信号(38)代入式(37),得

$$\hat{\boldsymbol{M}}_c \dot{\boldsymbol{S}} =$$

$$-\frac{\boldsymbol{S}}{\|\boldsymbol{S}\|} \frac{k_0 + b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \delta \|\boldsymbol{\tau}_{v1} + \boldsymbol{\tau}_{v2}\|}{1 - \delta} + \boldsymbol{\rho}. \quad (39)$$

**定理2** 对于给定的空间机器人混合体系统(18),若假设1成立,且采用式(36)设计的积分滑模面、式(38)设计的非奇异终端滑模控制信号,则可使系统在有限时间内收敛.

**证明** 选取如下形式的Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2} \boldsymbol{S}^T \hat{\boldsymbol{M}}_c \boldsymbol{S}. \quad (40)$$

对式(40)求导并结合式(39)得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{\|\boldsymbol{S}\|}{1 - \delta} (k_0 + b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \\ & \delta \|\boldsymbol{\tau}_{v1} + \boldsymbol{\tau}_{v2}\|) + \boldsymbol{S}^T \boldsymbol{\rho} = \\ & -\|\boldsymbol{S}\| (k_0 + b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \delta \|\boldsymbol{\tau}_{v1} + \boldsymbol{\tau}_{v2}\|) + \\ & \delta \|\boldsymbol{S}\| u + \boldsymbol{S}^T \boldsymbol{\rho} \leq \\ & -\|\boldsymbol{S}\| (k_0 + b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \delta \|\boldsymbol{\tau}_{v1} + \boldsymbol{\tau}_{v2}\|) + \\ & \delta \|\boldsymbol{S}\| u + \|\boldsymbol{S}\| \|\boldsymbol{\rho}\|. \end{aligned} \quad (41)$$

将式(35)代入(41),得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\|\boldsymbol{S}\| (k_0 + b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \delta \|\boldsymbol{\tau}_{v1} + \boldsymbol{\tau}_{v2}\|) + \\ & \delta \|\boldsymbol{S}\| u + \|\boldsymbol{S}\| (b_1 \|\dot{\boldsymbol{q}}_c\| + b_2 \|\ddot{\boldsymbol{q}}_c\|^2 + \delta \|\boldsymbol{\tau}_c\|) \leq \\ & -k_0 \|\boldsymbol{S}\| + \delta \|\boldsymbol{S}\| u + \delta \|\boldsymbol{S}\| \|\boldsymbol{\tau}_{v3}\| \leq -k_0 \|\boldsymbol{S}\|. \end{aligned} \quad (42)$$

结合式(33)和(40)得

$$V = \frac{1}{c_1 + c_2} \|\boldsymbol{S}\|^2. \quad (43)$$

再结合式(42)和(43)得

$$\dot{V} + k_0 \sqrt{c_1 + c_2} \sqrt{V} \leq 0. \quad (44)$$

通过引理1可知系统在有限时间内收敛.  $\square$

由于式(38)设计的仅为载体与左臂的控制力矩,为了均配各关节力矩以实现双臂协调控制,结合速度、位置约束,采用加权最小范数法,可得各关节控制力矩为

$$\boldsymbol{\tau}_g = \boldsymbol{\Xi} \boldsymbol{\Omega}^T (\boldsymbol{\Omega} \boldsymbol{\Xi} \boldsymbol{\Omega}^T)^{-1} \boldsymbol{\tau}_b. \quad (45)$$

其中: $\boldsymbol{\tau}_b = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T, \boldsymbol{\Xi} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 为对称正定的权值矩阵, $\boldsymbol{\Omega} = [\boldsymbol{E}_{3 \times 3}, (\boldsymbol{J}_{OR}^{-1} \boldsymbol{J}_{OL})^T], \boldsymbol{J}_{OR}, \boldsymbol{J}_{OL}$ 定义同式(10).

**注1** 由于式(38)设计的终端滑模控制信号含不连续项,可能导致系统抖振. 为了消除该现象,采用Slotine<sup>[31]</sup>提出的边界层方法,即:将式(38)中 $\boldsymbol{\tau}_{v3}$ 的不连续项改为 $\boldsymbol{\tau}_{v3} = (\boldsymbol{S}/(\|\boldsymbol{S}\| + s_0))u, s_0$ 为设计的边界层宽度. 另外,GWO算法也可以通过对控制参数的优化在一定程度上抑制抖振.

## 4 仿真模拟分析

### 4.1 SDD抗冲击性能模拟

采用图2的双臂空间机器人系统及卫星系统进行数值仿真.空间机器人系统参数为: $m_0 = 200\text{ kg}$ ,  $m_i = 10\text{ kg}$  ( $i = 1, 2, 4, 5$ ),  $m_j = 5\text{ kg}$  ( $j = 3, 6$ ),  $L_i = 2\text{ m}$ ,  $L_j = 1\text{ m}$ ,  $d_i = 1\text{ m}$ ,  $d_j = 0.5\text{ m}$ ,  $I_0 = 128\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $I_i = 15\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $I_j = 2\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $I_{mn} = 0.05\text{ kg}\cdot\text{m}^2$  ( $n = 1, \dots, 6$ ),  $k_{sn} = 1000\text{ N/rad}$ ,  $D_{mn} = 28.65\text{ N}\cdot\text{s/rad}$ ,  $D_{tn} = 1146\text{ N}\cdot\text{s/rad}$ ,  $D_{Ln} = 28.65\text{ N}\cdot\text{s/rad}$ ,  $\psi_1 = 2.791$

$\text{rad}$ ,  $\psi_2 = 0.349\text{ rad}$ .卫星系统参数为: $m_s = 50\text{ kg}$ ,  $d_s = 0.5\text{ m}$ ,  $I_s = 8.5\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .空间机器人初始位置为 $\mathbf{q} = [10^\circ, 120^\circ, -60^\circ, -60^\circ, 60^\circ, 60^\circ, 60^\circ]^\text{T}$ .

为了验证SDD在第3阶段碰撞过程中的抗冲击性能,给定多组卫星速度对关节所受冲击力矩进行模拟,结果如表1所示.由表1可见,在碰撞过程中,对于给定的不同卫星速度,SDD均能显著降低关节所受冲击力矩,且最大可以降低53.10%,因此可以认为其能在碰撞过程对关节起到较好的保护作用.

表1 不同卫星速度下SDD抗冲击性能对比

卫星速度/(m/s, m/s, (°)/s)	含SDD最大冲击力矩/(N·m)	不含SDD最大冲击力矩/(N·m)	降低百分比/%
$[0.05, 0.05, 8.6]^\text{T}$	150.36	254.29	40.87
$[0.05, 0, 0]^\text{T}$	52.87	97.90	46.00
$[0, 0.05, 0]^\text{T}$	6.74	14.37	53.10
$[0, 0, 8.6]^\text{T}$	89.88	152.85	41.97

### 4.2 缓冲柔顺策略性能模拟

为了保护空间机器人系统,在捕获操作第3阶段电机未开启,混合体系统处于自由翻滚状态.假设电机在碰撞后1.5s开启,此时混合体系统位置为 $\mathbf{q} = [10.46^\circ, 120.49^\circ, -62.57^\circ, -53.21^\circ, 62.93^\circ, 52.84^\circ, 68.95^\circ]^\text{T}$ .空间机器人初始速度、位置同4.1节,卫星速度为 $\dot{\mathbf{q}}_s(0) = [0.05, 0.05, 8.6]^\text{T}$ ,混合体系统期望状态为 $\mathbf{q}_d = [10^\circ, 120^\circ, -60^\circ, -60^\circ, 60^\circ, 60^\circ, 60^\circ]^\text{T}$ ,仿真时间为15s.

通过GWO对控制器的参数进行优化,其中设置狼群的数量为20头,最大迭代次数为50次,给定的指标函数为

$$O = \sqrt{\int_0^\infty |e_1(t)|^2 dt} + \sqrt{\int_0^\infty |e_2(t)|^2 dt} + \sqrt{\int_0^\infty |e_3(t)|^2 dt} + \sqrt{\int_0^\infty |e_4(t)|^2 dt}, \quad (46)$$

其中 $e_i(t)$ 为轨迹误差 $\mathbf{e}$ 中的元素.优化后的控制参数为: $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(337.21, 318.01, 319.03, 304.51)$ ,  $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(320.27, 329.91, 335.86, 336.54)$ ,  $\mu_1 = 0.802$ ,  $\mu_2 = 0.890$ ,  $k_0 = 1.034$ ,  $b_1 = 17.23$ ,  $b_2 = 13.42$ .设置 $c_1 = 0.01$ ,  $c_2 = 0.05$ ,  $\alpha_F = 1.1$ ,  $\beta_F = 1$ ,  $\delta_F = 0.9$ .

假设在负载情况下,关节能承受的冲击力矩为140N·m,因此,设置第1组仿真的关机力矩阈值为 $F_{C1} = 120\text{ N}\cdot\text{m}$ ,开机力矩阈值为 $F_{O1} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ ;考虑到随着双臂空间机器人服务年限的增加,关节能承受冲击力矩将会下降,设置第2组仿真的关机力矩阈值为 $F_{C2} = 100\text{ N}\cdot\text{m}$ ,开机力矩阈值为 $F_{O2} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ .

仿真曲线如图3~图10所示.

通过图3与图7对比可知,设置关机力矩阈值为 $F_{C2} = 100\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,电机经过开、关机6次后进入稳定输出状态,是将关机力矩设置为 $F_{C1} = 120\text{ N}\cdot\text{m}$ 时的两倍,系统的不稳定性增加;通过图4与图8的对比可知,两种情况下缓冲柔顺策略均能较好地将冲击力矩限制在安全范围内,且将关机力矩阈值设置为 $F_{C2} = 100\text{ N}\cdot\text{m}$ 时效果更佳;通过图5、图6与图9、图10的对比可知,两种情况下各关节角与载体姿态角

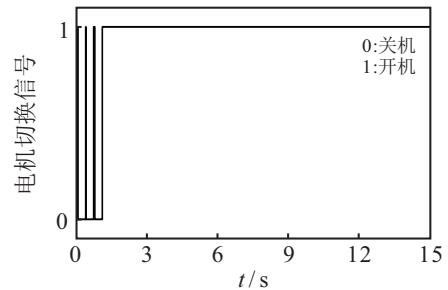


图3 电机切换信号( $F_{C1} = 120\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $F_{O1} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ )

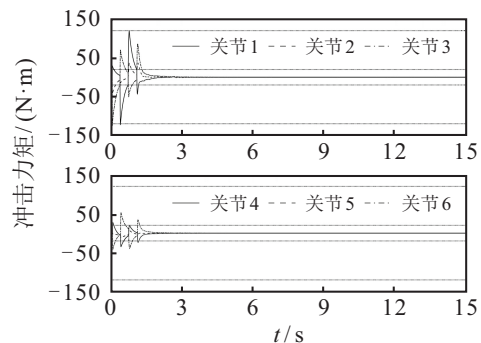


图4 关节冲击力矩( $F_{C1} = 120\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $F_{O1} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ )

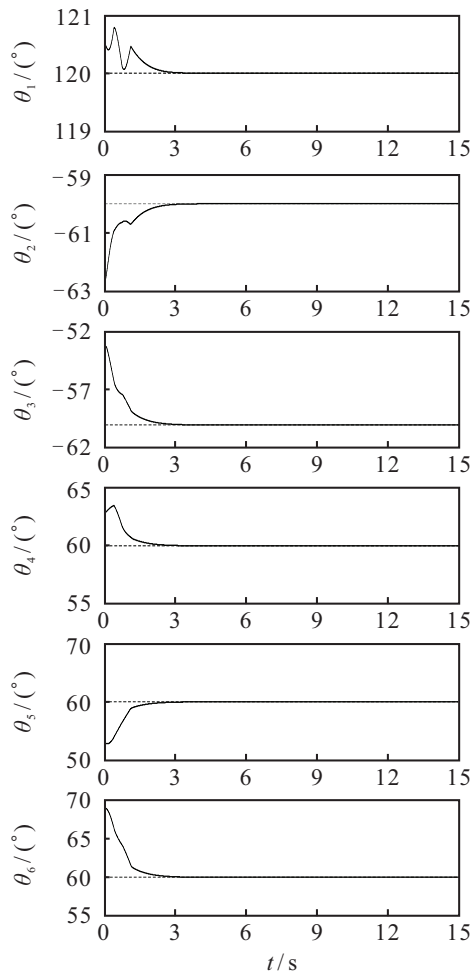


图5 关节角轨迹 ( $F_{C1} = 120 \text{ N}\cdot\text{m}, F_{O1} = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

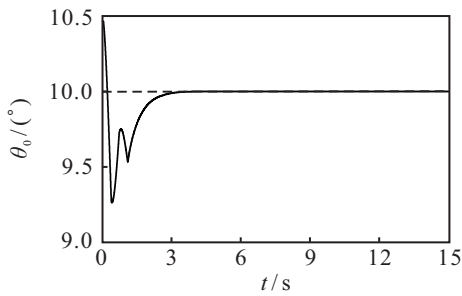


图6 载体姿态角轨迹 ( $F_{C1} = 120 \text{ N}\cdot\text{m}, F_{O1} = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

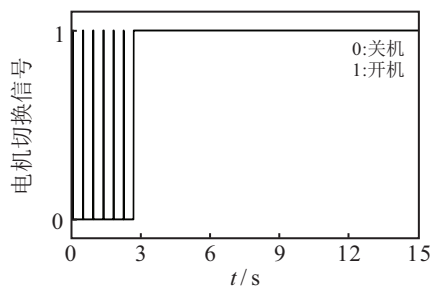


图7 电机切换信号 ( $F_{C2} = 100 \text{ N}\cdot\text{m}, F_{O2} = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

均能快速收敛,且滑模控制器的抖振也得到了较好地抑制,但将关机力矩阈值设置为  $F_{C2} = 100 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,轨迹跟踪的平稳性有所下降,即系统的稳定性降低.因此,为探讨柔顺策略的开、关机力矩阈值与SDD保护

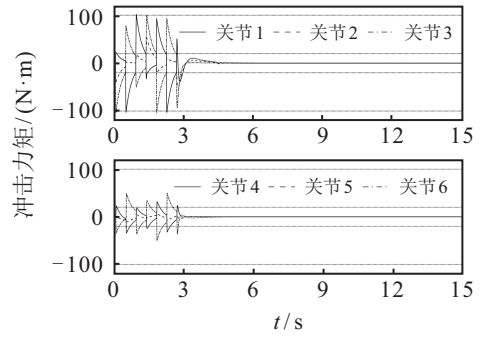


图8 关节冲击力矩 ( $F_{C2} = 100 \text{ N}\cdot\text{m}, F_{O2} = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

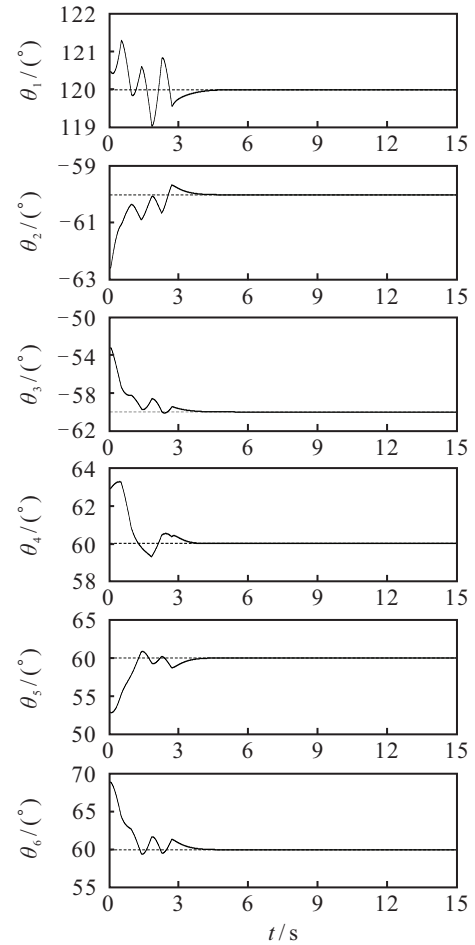


图9 关节角轨迹 ( $F_{C2} = 100 \text{ N}\cdot\text{m}, F_{O2} = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

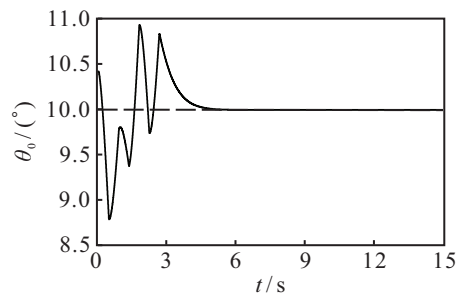


图10 载体姿态角轨迹 ( $F_{C2} = 100 \text{ N}\cdot\text{m}, F_{O2} = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

性能和系统稳定性之间的关系,有必要对开、关机力矩阈值的设置进行下一步分析.

1) 保持开机力矩阈值不变,将关机力矩阈值设置为接近关节能承受的冲击力矩,即设置第3组仿真

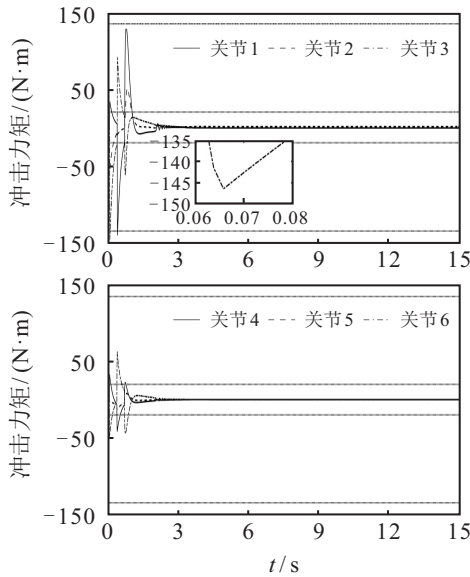


图11 关节冲击力矩( $F_{C3} = 135\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $F_{O3} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ )

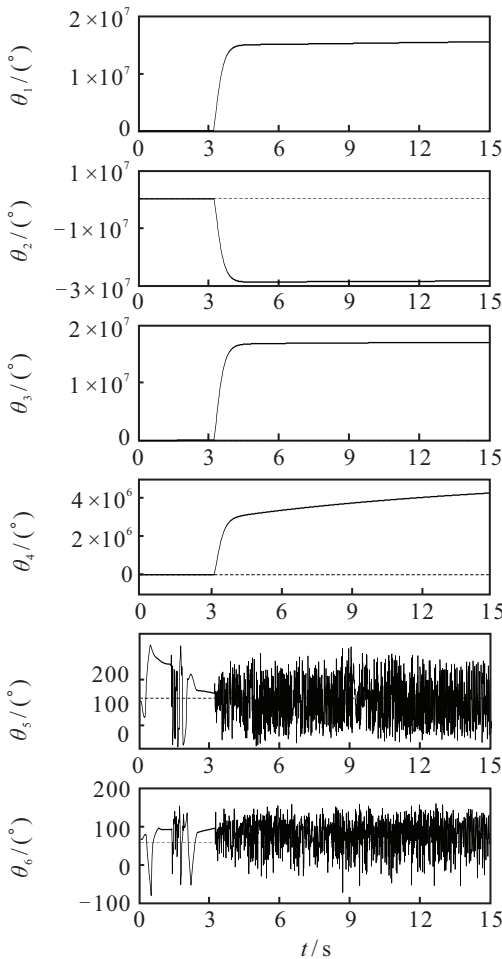


图12 关节角轨迹( $F_{C4} = 80\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $F_{O4} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ )

的关机力矩阈值为  $F_{C3} = 135\text{ N}\cdot\text{m}$ , 开机力矩阈值为  $F_{O3} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ . 仿真曲线如图11所示.

由图11可见, 设置关机力矩阈值  $F_{C3} = 135\text{ N}\cdot\text{m}$  时电机关停2次后进入稳定输出状态, 系统的稳定性得到了提升; 但由于SDD的反应时间存在一定的滞后性, 出现关节3的冲击力矩超过假定力矩上限的情

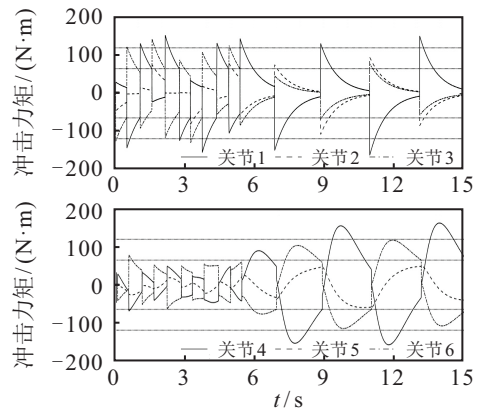


图13 关节冲击力矩( $F_{C5} = 120\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $F_{O5} = 65\text{ N}\cdot\text{m}$ )

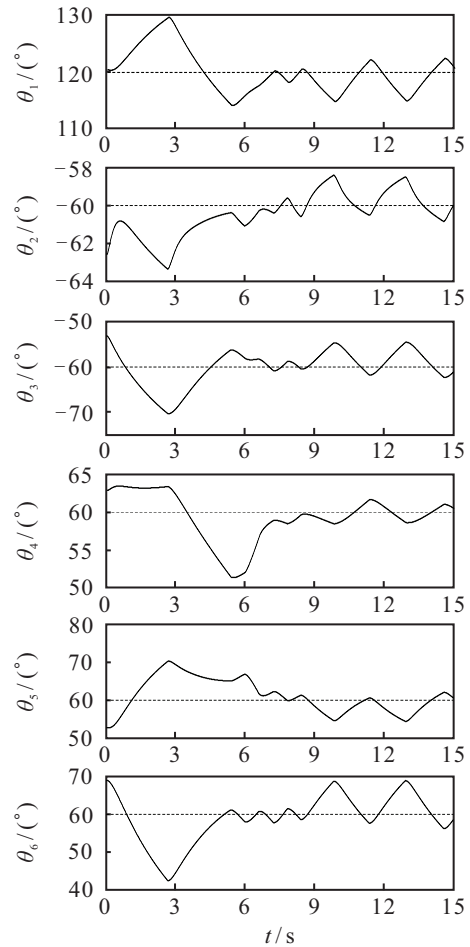


图14 关节角轨迹( $F_{C6} = 120\text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $F_{O6} = 5\text{ N}\cdot\text{m}$ )

况, 未达到保护关节的目的.

2) 保持开机力矩阈值不变, 将关机力矩阈值设置为远离关节能承受的冲击力矩, 即设置第4组仿真的关机力矩阈值为  $F_{C4} = 80\text{ N}\cdot\text{m}$ , 开机力矩阈值为  $F_{O4} = 20\text{ N}\cdot\text{m}$ . 仿真曲线如图12所示.

由图12可见, 设置关机力矩阈值  $F_{C4} = 80\text{ N}\cdot\text{m}$  时系统的稳定性明显降低, 且在3.2s后由于超调量过大, 系统镇定控制失败.

3) 保持关机力矩阈值不变, 将开机力矩阈值设置为远离零点, 即设置第5组仿真的关机力矩阈值为

$F_{C5} = 120 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 开机力矩阈值为  $F_{O5} = 65 \text{ N}\cdot\text{m}$ . 仿真曲线如图13所示.

由图13可见, 设置开机力矩阈值  $F_{O5} = 65 \text{ N}\cdot\text{m}$  时, 由于该阈值偏大导致冲击力矩无法被有效地卸载, 电机将持续处于开、关机切换状态, 且在5.4 s后出现系统振荡, 关节将被损坏.

4) 保持关机力矩阈值不变, 将开机力矩阈值设置为接近零点, 即设置第6组仿真的关机力矩阈值为  $F_{C6} = 120 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 开机力矩阈值为  $F_{O6} = 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ . 仿真曲线如图14所示.

由图14可见, 设置开机力矩阈值  $F_{O6} = 5 \text{ N}\cdot\text{m}$  时, 由于SDD卸载冲击力矩到较小值时需花费较长的时间, 电机的关机时间被延长, 即系统处于无控状态的时间增加, 导致系统严重偏离理想状态, 使后续镇定控制难以实现.

基于以上分析可知: 若所提出的柔顺策略想同时兼顾SDD的保护性能和系统的稳定控制, 则需要合理地设置开、关机力矩阈值. 关机力矩阈值设置得太大会出现冲击力矩超过关节所能承受极限力矩的情况, 使SDD丧失对关节的保护功能; 关机力矩阈值设置得太小则会极大增加系统的超调量, 导致镇定控制失败; 开机力矩阈值设置得太大会导致冲击力矩卸载不完全而引发系统振荡; 开机力矩阈值设置得太小则会延长系统处于自由翻滚的时间使镇定控制难以实现.

## 5 结 论

针对空间机器人捕获非合作卫星的关节保护问题, 设计了一种弹簧阻尼机构, 提出了一种与之匹配的积分终端滑模柔顺策略, 且通过灰狼优化算法对滑模控制器的参数进行优化, 实现了混合体系统的快速镇定控制. 主要结论如下:

1) 所设计的弹簧阻尼机构可以在碰撞过程中有效减小关节所受碰撞冲击力矩.

2) 配合弹簧阻尼机构设计的柔顺策略可以在镇定控制过程中将关节所受瞬时冲击力矩限制在安全范围内.

3) 灰狼优化控制算法可实现滑模控制器的参数优化, 完成混合体系统的快速镇定.

## 参考文献(References)

[1] Kimmell K. The UCS satellite database, union of concerned scientists, cambridge, massachuset, US. 2016[EB/OL]. <http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellitedatabase>.

- [2] Liu X F, Cai G P, Wang M M, et al. Contact control for grasping a non-cooperative satellite by a space robot[J]. *Multibody System Dynamics*, 2020, 50(2): 119-141.
- [3] Stolfi A, Gasbarri P, Sabatini M. A parametric analysis of a controlled deployable space manipulator for capturing a non-cooperative flexible satellite[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 148: 317-326.
- [4] Zhang Y Z, Huang P F, Meng Z J, et al. Precise angles-only navigation for noncooperative proximity operation with application to tethered space robot[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(3): 1139-1150.
- [5] 艾海平, 陈力. 空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 355-362.  
(Ai H P, Chen L. Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(2): 355-362.)
- [6] Ventura J, Ciarcia M, Romano M, et al. An inverse dynamics-based trajectory planner for autonomous docking to a tumbling target[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. San Diego, 2016: 876.
- [7] Nicolis D, Palumbo M, Zanchettin A M, et al. Occlusion-free visual servoing for the shared autonomy teleoperation of dual-arm robots[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(2): 796-803.
- [8] Abdul Hafez A H, Mithun P, Anurag V V, et al. Reactionless visual servoing of a multi-arm space robot combined with other manipulation tasks[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 91: 1-10.
- [9] Jiao C T, Liang B, Wang X Q. Adaptive reaction null-space control of dual-arm space robot for post-capture of non-cooperative target[C]. *The 29th Chinese Control and Decision Conference*. Chongqing, 2017: 531-537.
- [10] Takahashi R, Ise H, Konno A, et al. Hybrid simulation of a dual-arm space robot colliding with a floating object[C]. *The IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, 2008: 1201-1206.
- [11] 程靖, 陈力. 空间机器人双臂捕获卫星力学分析及镇定控制[J]. *力学学报*, 2016, 48(4): 832-842.  
(Cheng J, Chen L. Mechanical analysis and calm control of dual-arm space robot for capturing a satellite[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(4): 832-842.)
- [12] Jia Y H, Hu Q, Xu S J. Dynamics and adaptive control of a dual-arm space robot with closed-loop constraints and uncertain inertial parameters[J]. *Acta Mechanica Sinica*,

- 2014, 30(1): 112-124.
- [13] Yan L, Xu W F, Hu Z H, et al. Virtual-base modeling and coordinated control of a dual-arm space robot for target capturing and manipulation[J]. *Multibody System Dynamics*, 2019, 45(4): 431-455.
- [14] Dimitrov D N, Yoshida K. Utilization of the bias momentum approach for capturing a tumbling satellite[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Sendai, 2004: 3333-3338.
- [15] Yoshida K, Dimitrov D, Nakanishi H. On the capture of tumbling satellite by a space robot[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, 2006: 4127-4132.
- [16] Flores-Abad A, Zhang L, Wei Z, et al. Optimal capture of a tumbling object in orbit using a space manipulator[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 86(2): 199-211.
- [17] Raina D, Gora S, Maheshwari D, et al. Impact modeling and reactionless control for post-capturing and maneuvering of orbiting objects using a multi-arm space robot[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 182: 21-36.
- [18] Uyama N, Nakanishi H, Nagaoka K, et al. Impedance-based contact control of a free-flying space robot with a compliant wrist for non-cooperative satellite capture[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vilamoura-Algarve, 2012: 4477-4482.
- [19] Abdul H A H, Mithun P, Anurag V V, et al. Reactionless visual servoing of a multi-arm space robot combined with other manipulation tasks[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 91: 1-10.
- [20] 侯明冬, 王印松. 一种无模型自适应积分终端滑模控制方法[J]. *控制与决策*, 2018, 33(9): 1591-1597.  
(Hou M D, Wang Y S. A model-free adaptive integral terminal sliding mode control method[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(9): 1591-1597.)
- [21] Chiu C S. Derivative and integral terminal sliding mode control for a class of MIMO nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2012, 48(2): 316-326.
- [22] Galicki M. Finite-time trajectory tracking control in a task space of robotic manipulators[J]. *Automatica*, 2016, 67: 165-170.
- [23] Feng Y, Yu X H, Man Z H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. *Automatica*, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [24] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69: 46-61.
- [25] Sanjay R, Jayabarathi T, Raghunathan T, et al. Optimal allocation of distributed generation using hybrid grey wolf optimizer[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 14807-14818.
- [26] Li L G, Sun L J, Kang W, et al. Fuzzy multilevel image thresholding based on modified discrete grey wolf optimizer and local information aggregation[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 6438-6450.
- [27] Zhao L, Wang X. A deep feature optimization fusion method for extracting bearing degradation features[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 19640-19653.
- [28] Spong M W, Hutchinson S, Vidyasagar M. Robot modeling and control[J]. *Industrial Robot an International Journal*, 2006, 17(5): 709-737.
- [29] Bhat S P, Bernstein D S. Continuous finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(5): 678-682.
- [30] Man Z H, Palaniswami M. Robust tracking control for rigid robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(1): 154-159.
- [31] Slotine J J E. *Applied nonlinear control* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 195-203.

### 作者简介

朱安 (1994—), 男, 博士生, 从事空间机器人系统动力学与控制的研究, E-mail: zhu\_an24@sina.com;

陈力 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事空间机器人系统动力学与控制等研究, E-mail: chnle@fzu.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)